

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560122

研究課題名（和文） ラピッドローテーション鏡面研削によるナノ表面構造の創成

研究課題名（英文） Nano-Surface Structuring using Rapid Rotation Mirror-like-surface Grinding

研究代表者

太田 稔 (OTA MINORU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：60504256

研究成果の概要（和文）：

砥石周速度と工作物周速度の両方を高速化し、トランケートツルーイング・マイクロドレッシングを施した粗粒cBNホイールを用いる研削方法としてラピッドローテーション鏡面研削 (RRMG) 法を考案した。RRMG実験装置を開発し、RRMG法によるナノ表面構造創成の可能性を検討した。その結果、高い加工効率で良好な表面性状をもち、緻密化したナノ表面構造をもつ鏡面の研削が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Rapid Rotation Mirror-like surface Grinding (RRMG) was investigated as high efficiency grinding method with high wheel speed and high work speed using coarse grain cBN grinding wheel trued by truncate truing with micro dressing method. RRMG machine was developed and the possibility of nano-surface structuring using RRMG method was examined. As a result, it was clarified that the possibility of high efficiency mirror-like-surface grinding was demonstrated with excellent surface quality and nano-surface structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：精密加工・研削加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：機械工作・生産工学、精密部品加工

1. 研究開始当初の背景

これまでに研究者らは、砥石周速度の高速化に加えて、工作物周速度を高速化するラピッドローテーション研削（以下、RRG (Rapid Rotation Grinding) と呼ぶ）法を開発し、RRGにより、工作物表面性状を悪化させることなく、高能率研削が可能であることを実証した。また、工作物周速度が高い領域で加工変質層が

極めて小さくなる現象が観察された。

一方で、粗粒cBNホイールを用いた研削において、ツルーイング・ドレッシング条件を制御することによって、比較的高能率に鏡面を得ることができることを明らかにした。

しかしながら、高能率研削と鏡面研削の両立は極めて困難であり、高能率に鏡面研削を行おうとすると表面性状が悪化するという

問題があった。

そこで本研究では、RRGによる表面性状改善効果とツルーイング・ドレッシング条件を制御して鏡面を得る鏡面研削法による表面粗さ改善効果を融合し、新たにラピッドローテーション鏡面研削（以下、RRMG(Rapid Rotation Mirror-like-surface Grinding)と呼ぶ)法を考案した。これにより、表面性状を悪化させることなく、高能率に鏡面を得ることが可能になるものと考えた。さらに、熱影響層を極限まで小さくすることによって、工作物の極表層に緻密化されたナノ結晶構造層が形成されるものと考えた。

2. 研究の目的

本研究は、砥石周速度を 200m/s 以上の超高速とし、同時に工作物周速度を高速化して研削を行う、RRG 法にトランケートツルーイング・マイクロドレッシング（以下、TTMD(Truncate Truing with Micro Dressing)と呼ぶ)法を組み合わせたラピッドローテーション鏡面研削 (RRMG) 法によって、極めて高い加工能率で鏡面研削を可能とし、さらに工作物の極表層にナノ結晶構造を創成しようとするものである。具体的な研究の目的は下の通りである。

- (1) 砥石周速度 200m/s を超える領域で、RRMG コンセプト実証のための研削盤を開発する。
- (2) 超高速鏡面研削における TTMD 法の原理を証明し、砥粒切れ刃表面状態と研削特性との関係を解明する。
- (3) RRMG により、良好な表面性状とナノ結晶表面構造をもつナノ鏡面を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、まず、超高速平面研削盤を改造し、超高速ドレッシング装置および超高速ワークスピンドルを搭載した、RRMG 装置を開発し、その基本性能を確認した。次に、TTMD 法による鏡面研削メカニズムについて解析を行い、砥粒逃げ面テクスチャと工作物表面特性の関係を検討した。その上で、RRMG 法のコンセプトを実証し、ナノ結晶構造を有するナノ鏡面を実現しようとした。以下、年度ごとに具体的な計画・方法について述べる。

(1) 平成 21 年度

RRMG 装置のベースとなる超高速平面研削盤の精度改修を行い、砥石周速度 200m/s に対応できる超高速ツルーイング装置を製作するとともに、RRMG コンセプトの実験条件をカバーできる超高速ワークスピンドルを製作し、実験装置の基本性能を確認した。

(2) 平成 22 年度

開発した実験装置により、RRMG コンセプトに基づく研削実験が可能か否か判断するため、まず、砥石周速度 160m/s 対応の粗粒ビ

トリファイドボンド cBN ホイールを製作し、適応するダイヤモンドロータリーツールを用いて TTMD(以下、ツルーイングと呼ぶ)基礎実験を実施した。また、砥粒表面の観察方法及び解析方法について検討した。

(3) 平成 23 年度

砥石周速度 200m/s が可能なチタン合金コア製のビトリファイドボンド粗粒 cBN ホイールを試作し、適応するダイヤモンドロータリーツールを用いて、砥石周速度 200m/s におけるツルーイング実験を行い、砥粒表面状態を観察するとともに、RRMG 実験を行い、研削後の工作物の表面状態を解析した。

4. 研究成果

本研究では、RRMG法によって極めて高い加工能率で鏡面研削を可能とし、さらに工作物の極表層にナノ結晶構造を創成しようとするものである。そのために、(1)RRMG実験装置を開発し、(2)TTMD法の原理と研削特性との関係を解明するとともに、(3)RRMGによる高能率研削実験を行い、工作物表面状態を解析した。以下、得られた研究成果を述べる。

(1) RRMG実験装置の開発

研削盤本体は、クリープフィード平面研削盤 (QSG - 51NG, (株)岡本工作機械製作所製) の砥石軸および砥石軸コラムを超高速仕様に変更した超高速平面研削盤をベースとした。砥石軸にはオイルエア潤滑方式を採用した最高回転数30000 min^{-1} で使用可能な超高速砥石軸を搭載している。実験装置の外観を図1に示す。

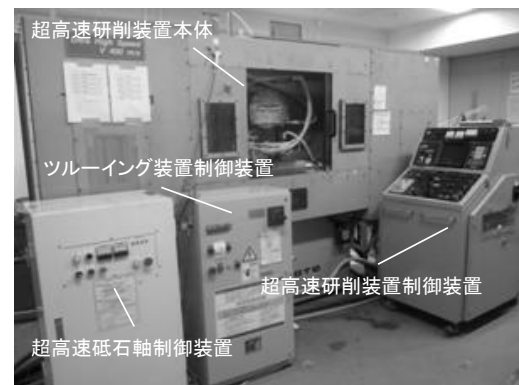


図1 超高速研削装置の外観

超高速平面研削盤を流用して、RRMGを可能とするために、Z軸移動テーブル上に超高速ツルーイング装置と超高速ワークスピンドルを設置した。また、ドレッシングを施すことを考慮に入れて、ドレッシング砥石用架台もZ軸テーブル上に設けた。超高速ツルーイング装置には、最高回転数32000 min^{-1} のロータリー型超高速ツルーイング装置 ((株)ジェイテクト製) を用いた。直径 $\phi 100\text{mm}$ のダイヤモンド

ドツールアで最高周速度167m/sを可能とし、砥石周速度200m/sに対応できるようにした。また、超高速ワークスピンドルには、最高回転数23000 min⁻¹の超高速ツルーイング装置 (DRS-LB, (株)ノリタケカンパニーリミテド製) を流用し、超高速で工作物を回転させることが可能なようにした。ラピッドローテーション研削装置主要部を図2に示す。

また、ラピッドローテーション研削では砥石周速度が非常に大きいため、砥石周辺の空気が砥石に連れ回り、通常的手法では研削点へのクーラント供給は難しい。そこで、砥石周辺の空気の連れ回りを遮断するために、図3のような遮風板を取り付けたクーラント供給ノズルを製作した。遮風板下の空間が負圧となるため、クーラントは空気の層に遮られることなく研削点に供給される。

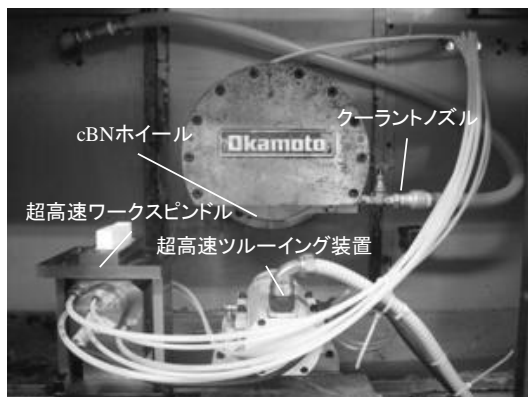


図2 ラピッドローテーション研削装置

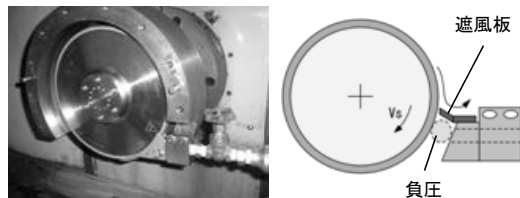


図3 クーラント供給ノズルの概要

(2) トランケートツルーイング・マイクロドレッシング特性の解明

超高速鏡面研削の実験に先立ち、トランケートツルーイング・マイクロドレッシング(以下、ツルーイングと呼ぶ)を施したcBNホイールの砥粒表面状態について調査した。まず、基礎実験用として、直径 $D=250$ mmで砥石周速度 $V_s=160$ m/s対応のビトリファイドボンドcBNホイール (BN200M200VE2, (株)アライドマテリアル製) を製作した。超高速対応のため、ホイールは中心穴のない構造とし、ホイールコア形状は両ドビテール型を採用した。コア材質はSCM440とした。ツールアにはメタルボンドダイヤモンドホイール (SD120P100D31) を採用した。先の研究より、超高速鏡面研削においては、#200のcBNホイールのツルー

イングには#120のダイヤモンドホイールが適していることが明らかとなっている。砥粒層の幅は0.5 mmとして、砥粒が直線に近い形で配置されるように設計した。

実験は、cBNホイールを表1に示す条件でツルーイングを行った後、砥粒切れ刃逃げ面を観察し、さらにその表面粗さを測定した。ツルーイング後、ホワイトストーン (WA220GV) を用いてドレッシングを行った。これは、ツルーイングによってボンドが砥粒表面より突き出て初期の研削性能を低下させることを避けるためである。cBNホイールとツールアの接触検知はAEセンサ (AE-901S-WP, NF回路設計プロック(株)製) を使用した。砥粒切れ刃表面はレプリカフィルムに転写し、走査型電子顕微鏡 (FSM-7001F, 日本電子(株)製) および非接触表面形状測定機 (New View 7300, ザイゴ(株)製) を用いて観察・解析した。

表1 ツルーイング条件

ツールア	SD120P100D31
ツルーイング方式	トラバース方式
砥石周速度 V_s	40, 80, 120, 160 m/s
ツールア・砥石周速度比 V_t/V_s	0.2, 0.5, 0.8
ツルーイングリッド f_t	0.01, 0.05, 0.1 mm/rev

図4に、砥石周速度を $V_s=40$ m/s、周速度比を $V_t/V_s=0.2$ と一定とし、ツルーイングリッド f_t を変化させた場合の砥粒切れ刃逃げ面のSEM画像を示す。図(a), (b)より、 $f_t=0.01$ mm/revの方がより砥粒が平坦化され、微細な凹凸が形成されていることがわかる。

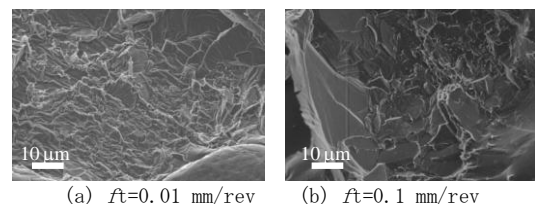


図4 ツルーイングリッドによる砥粒切れ刃逃げ面状態の比較

図5に、ツルーイングリッド f_t と砥粒切れ刃逃げ面の表面粗さ R_a の関係を示す。図より、ツルーイングリッド f_t を小さくするほど、砥粒切れ刃の表面粗さが小さくなっている。本研究で使用している#120のツールアは粒径が100 μ m程度である。そして砥粒層の幅が0.5 mmと小さく、ダイヤモンド砥粒は直線に近い分布で並んでいると考えられる。さらに、#200のcBN砥粒の粒径は60 μ m程度である。したがって、砥粒切れ刃を平坦化し、微細な凹凸を形成するには、ツルーイングリッド f_t は小さい方が適していると考えられる。しかし、周速度比 $V_t/V_s=0.5$ の場合、 $f_t=0.01$ mm/revにおいて表面粗さは大きくなっている。これは、砥

粒が平坦化されたために接触面積が増大し、抵抗が増大することで、砥粒が大きく破碎されたためと考えられる。以上より、砥粒切れ刃逃げ面の表面粗さは、ツルーイングリード f_t によって制御できると考えられる。

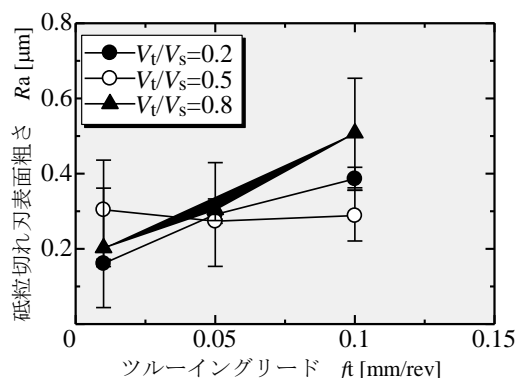


図5 ツルーイングリードと砥粒切れ刃逃げ面表面粗さの関係

図6に、周速度比 $V_t/V_s=0.2$ 、ツルーイングリード $f_t=0.01$ mm/revと一定とし、砥石周速度を変化させた場合の、砥粒切れ刃逃げ面のSEM画像を示す。図(a)、(b)を比較しても、砥粒に微細な凹凸が形成されていることは確認できるが、周速度によって大きな差は見られなかった。

図7に、周速度比 V_t/V_s と砥粒切れ刃逃げ面表面粗さ R_a の関係を示す。この結果からも砥石周速度による表面粗さの変化には傾向が見られない。しかし、周速度比 V_t/V_s に着目すれば、周速度比 V_t/V_s が小さくなると表面粗さはわずかに低下する傾向にあることがわかる。また、図5と比較すると、周速度比 V_t/V_s よりもツルーイングリード f_t による影響の方が大きいと考えられる。

以上より、ツルーイングリード f_t を小さくし、周速度比 V_t/V_s を小さくするほど、砥粒切れ刃逃げ面の表面粗さは小さくなることがわかった。さらに、ツルーイングリード f_t が表面粗さに及ぼす影響がより大きいことが明らかとなった。これにより、RRMGにおいて砥粒切れ刃逃げ面性状を最適化するためのツルーイング条件が明らかとなった。

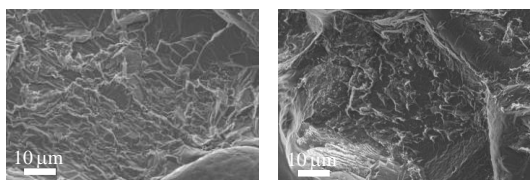


図6 砥石周速度による砥粒切れ刃逃げ面状態の比較

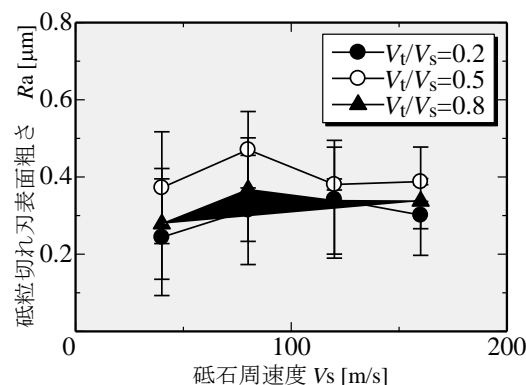


図7 砥石周速度による砥粒切れ刃表面粗さの関係

(3) RRMGによるナノ表面構造の創成

砥石周速度に加えて工作物周速度も高速化するRRMGと、前述のTTMDを複合したRRMGでは、周速度の高速化による熱源移動速度の増加により、工作物は極表層のみ局部加熱され、直後に急速冷却される。したがって、内部の温度上昇は小さく、加工変質層は極めて小さくなるものと考えられる。これによって、工作物の極表層がナノ結晶化され、硬く強い表層が形成されると期待できる。本章では、RRMGによる工作物品質の向上を実証するために、超高速研削領域でRRMG実験を行った。砥石周速度 $V_s=200$ m/s、工作物周速度 V_w を従来研削条件の約10倍まで高速化させた際の、工作物表面粗さや表面近傍の断面組織、残留応力について述べる。工作物の表面粗さは触診式表面粗さ測定機（サーフコーダSE300-39、(株)小坂研究所製）で測定した。

超高速研削用cBNホイールとして、チタン合金製コアを採用し、砥石周速度 $V_s=200$ m/s対応のビトリファイドボンドcBNホイール(BN200M200VE2、(株)アライドマテリアル製)を製作した。工作物は高周波焼入れした炭素鋼(S45C)とし、アップカット方式で円筒プランジ研削を行った。表2にツルーイング条件を示す。

表2 ツルーイング条件

ツルーア	SD120P100D31 ($\phi 100$ mm \times 0.5 mm)
砥石周速度 V_s	80 ~200 mm/s
周速度比 V_t/V_s	0.2
ツルーイングリード f_t	0.01 mm/rev
切込み a_p	2.0 μ m/rev
ツルーイング回数	10

砥石周速度 V_s は80 m/sから200 m/sで、工作物周速度 V_w は周速度比 V_s/V_w に対応して48 m/minから480 m/minとした。総切込み量30 μ mのプランジ研削とし、仕上げ研

削条件ではプランジ切込みに続けてスパークアウトを行った。研削能率 Z' は粗研削条件では $3 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 、仕上げ研削では $0.5 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ で一定とした。研削前のツールイングは、前章で最も砥粒切れ刃表面粗さが小さく抑えられた条件で行った。表 3 に研削条件を示す。

表 3 研削条件

研削砥石	BN200M200VE2 ($\phi 250 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)
工作物	S45C (HRC53~58) ($\phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$)
砥石周速度 V_s	80 ~ 200 mm/s
工作物周速度 V_w	48 ~ 480 mm/min
研削能率 Z'	0.5, 3.0 $\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$
スパークアウト	0, 5 s
研削液	ソリュブルタイプ (5%)

図 8 に、粗研削時の砥石周速度と工作物表面の算術平均粗さ Ra との関係を示す。粗研削時における工作物表面粗さは、砥石周速度の高速化に対してほぼ一定の値であるのに対し、工作物周速度の高速化に伴って増加していることがわかる。円筒外面研削における算術平均粗さの理論値 Ra_{th} は式 (1) で与えられる。ここで、 C は砥石の仕様と工作物の材質で決まる係数である。

$$Ra_{th} = C \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{0.67} \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{d_w} \right)^{0.33} \quad (1)$$

式 (1) から、工作物周速度が高速化することによって算術平均粗さ Ra が上昇することは明らかである。しかしながら、工作物周速度が 4 倍になると理論式では算術平均粗さ Ra が約 2.5 倍になるのに対し、実験値は 1.5 倍程度である。特に砥石周速度が高速の領域においては、工作物表面粗さの増加率は約 1.3 倍まで抑えられている。これは、砥石周速度と工作物周速度がともに高速化することで、砥粒切込み角度が大きくなり、工作物表面における砥粒の上すべり現象が抑制された結果と考えられる。一方、仕上げ研削では、砥石周速度の高速化に伴い、表面粗さ Ra が上昇する傾向が認められるものの、工作物周速度にはほぼ依存せず、RRMG 領域においても $Ra: 0.08 \mu\text{m}$ 以下の鏡面が得られた。以上の結果より、RRMG 法において工作物高速化の領域で $Ra: 0.08 \mu\text{m}$ 以下の鏡面を得られることが判明した。

次に、研削後の工作物表面状態を観察した結果について述べる。図 10 に、研削能率 Z' を $0.5 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ とした仕上げ研削条件において、従来条件および RRMG 条件での工作物

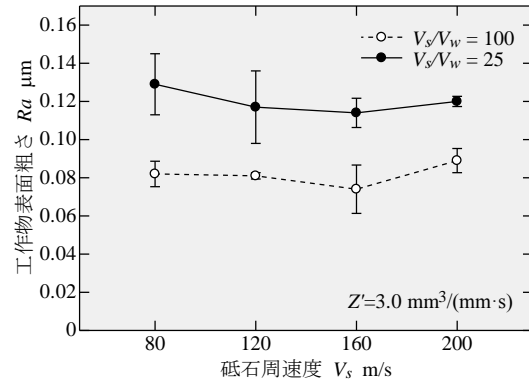


図 8 粗研削条件における砥石周速度 V_s と工作物表面粗さ Ra の関係

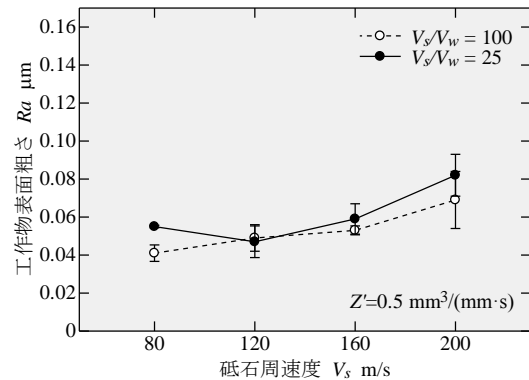


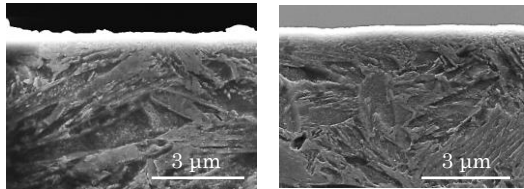
図 9 仕上げ研削条件における砥石周速度 V_s と工作物表面粗さ Ra の関係

表層の金属組織を走査型電子顕微鏡を用いて、研削方向に対して垂直な断面を観察した結果を示す。高周波焼入れによるマルテンサイト組織が見られ、両者に大きな差は認められないが、RRMG 条件においては工作物の極表面層部分では組織が緻密化されていることがわかる。これは、研削能率一定の条件では工作物周速度の高速化に伴い、工作物一回転あたりの切込みが極めて小さくなり、バニシ作用が働いたためと考えられる。

また、図 11 に X 線応力測定装置 (微小部 X 線応力測定装置, 理学電機 (株) 製) を用いて測定した工作物表層の残留応力分布を示す。従来の研削条件では最大で約 600 MPa の引張残留応力が発生しているのに対し、RRMG 条件では、圧縮の残留応力を示している。工作物表層の残留応力は、機械的に加えた塑性変形、熱応力による塑性変形、金属組織変化による体積変化などの要因が重畳して発生する。RRMG 条件においては、研削における熱源となる砥粒と工作物との接触点が高速で移動するため、工作物表層での熱影響が減少することで、熱応力による塑性変形が大幅に低減され、残留応力が抑えられたと考えられる。また、上述のバニシ作用による機械的要因も寄与することで、圧縮残留応力が発生したもの

と思われる。

これらの結果より、砥石周速度および工作物周速度を高速化させた RRMG 法によって、研削能率は一定に保ちながら、極めて工作物品質の高い研削加工の実現に成功し、合わせて、工作物極表面に緻密なナノ結晶構造を形成することができた。



(a) 従来条件 ($V_s=80$ m/s, $V_w=48$ m/min) (b) RRMG 条件 ($V_s=200$ m/s, $V_w=480$ m/min)

図 10 工作物表面層の SEM 像

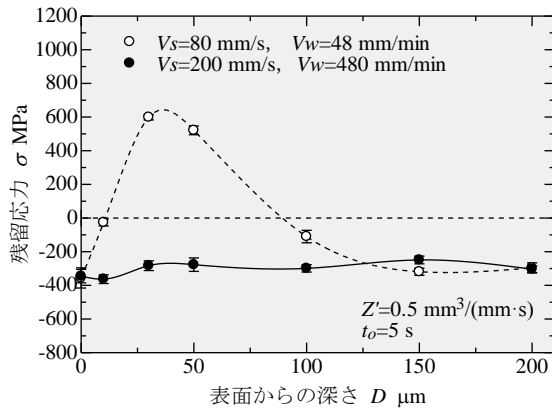


図 11 工作物表面層の残留応力分布

以上の研究成果を要約すると以下のようになる。

- (1) ラピッドローテーション鏡面研削のコンセプトを実証するための超高速研削実験装置を開発した。
- (2) トランケートツルージング・マイクロドレッシングを施した粗粒 cBN ホイールの砥粒逃げ面の破碎状態および表面粗さが

研削後の工作物表面粗さを支配する要因であることがわかった。

- (3) ラピッドローテーション鏡面研削により、工作物極表面にナノ結晶構造をもつナノ鏡面が創成できる可能性を実証できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 山崎遼, 久保公秀, 田中景一郎, 太田稔, 江頭快, 山口桂司, 秋田恭伯, 鈴木祥司, ラピッドローテーション鏡面研削による高能率・高品位表面仕上げ, 第 1 報: 超高速研削装置の開発とツルージング特性, 2012 年度砥粒加工学会学術講演会 (発表確定).
- ② 山口桂司, 山崎遼, 久保公秀, 太田稔, 江頭快, 秋田恭伯, 鈴木祥司, ラピッドローテーション鏡面研削による高能率・高品位表面仕上げ, 第 2 報: 鏡面研削における工作物表面品位の向上, 2012 年度砥粒加工学会学術講演会 (発表確定).

[図書] (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 稔 (OTA MINORU)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授
研究者番号: 6 0 5 0 4 2 5 6

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: